

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengecoran

Pengecoran merupakan salah satu cabang dari ilmu teknik yang bertujuan untuk membentuk logam atau material lain menjadi bentuk yang diinginkan sesuai dengan kebutuhan. Dalam ilmu teknik mesin kebanyakan material yang digunakan dalam bidang pengecoran adalah logam. Pengecoran daur ulang logam merupakan salah satu solusi dan alternative didalam pengembangan industri di Indonesia. Pengecoran aluminium memiliki peranan penting didalam perkembangan industri aluminium sejak ditemukannya pada akhir abad XIX. Produk komersial aluminium hasil cor yang pertama adalah peralatan rumah tangga dan komponen-komponen dekorasi. Namun karena banyaknya produk yang berbahan dasar aluminium menyisakan masalah baru yaitu banyaknya limbah produk berbahan dasar aluminium yang tidak terpakai, untungnya aluminium merupakan bahan yang bisa di daur ulang, sehingga perlu adanya pengetahuan yang baru dibidang daur ulang aluminium.

Salah satu contoh dari proses daur ulang aluminium adalah pengecoran ulang aluminium kampas rem dan aluminium siku seperti yang di lakukan oleh (suyanto, 2016) yang melakukan penelitian tentang proses pengecoran ulang aluminium bekas kampas rem dan aluminium siku dengan penambahan unsur TiB sebanyak 0,5 % menunjukan pengaruh pada penurunan ukuran butir hingga 50%, peningkatan kekerasan hingga 23%, peningkatan kekuatan tarik hingga 11%, serta penurunan keuletan hingga 20%.

Selain itu salah satu pengembangan pengetahuan di bidang daur ulang juga dilakukan oleh (bondan dkk, 2008) yang mengatakan Pengecoran squeeze mampu mengurangi cacat penyusutan, struktur silikon semakin halus, meningkatkan dan meratakan distribusi kekerasan Brinell. Penurunan temperatur cetakan menyebabkan struktur silikon semakin halus dan kekerasan naik.

2.1.1 Proses Pengecoran

Proses pengecoran merupakan tahapan yang sangat penting dalam bidang teknik mesin karena kebanyakan peralatan teknik mesin yang memanfaatkan aplikasi dari proses pengecoran logam. Selain itu pemanfaatan limbah sebagai bahan baku industri juga semakin meningkat sehingga menciptakan peluang baru bagi masyarakat untuk mendapatkan keuntungan dari limbah daur ulang. Salah satu contoh daur ulang logam adalah limbah aluminium bekas yang dimanfaatkan menjadi berbagai peralatan yang bernilai ekonomis. Seperti yang dilakukan (roziqin dkk, 2012) yang melakukan penelitian tentang pengaruh model system saluran pada proses pengecoran aluminium daur ulang terhadap struktur mikro dan kekerasan coran pulli diameter 76 mm dengan cetakan pasir.

Adapun proses pengecoran dapat di bagi menjadi lima tahapan yang saling berurutan, seperti di bawah ini :

1. Persiapan pembuatan cetakan.
2. Proses pencairan logam (melting).
3. Proses penuangan logam ke dalam cetakan (pouring).
4. Proses pendinginan atau pembekuan logam dan pelepasan logam dari cetakan.

5. Proses finishing, dapat di bagi sebagai berikut :

- a. Memeriksa produk pengecoran
- b. Membersihkan produk pengecoran
- c. Pemotongan bagian yang tidak sesuai cetakan
- d. Penyesuaian ukuran dengan cara proses machining
- e. Memperbaiki sifak mekanik logam pengecoran dengan perlakuan panas

2.1.2 Cetakan

Cetakan merupakan alat utama yang sangat penting dalam proses pengecoran logam, karena fungsi utamanya adalah untuk membentuk cairan logam menjadi logam padat dengan bentuk yang di inginkan.

1. Jenis-Jenis Cetakan

- a. Cetakan tidak permanen (expendable mold)

Cetakan jenis ini merupakan cetakan yang dapat digunakan sekali saja, karena setelah digunakan cetakan akan langsung hancur. Jenis cetakan ini ada tiga antara lain : cetakan pasir (sand casting), cetakan presisi (precisian casting), dan cetakan kulit (shell mold casting). Namun dari ketiga jenis cetakan ini yang paling banyak digunakan adalah cetakan pasir.

- b. Cetakan Permanen (permanent mold)

Cetakan permanen mold adalah jenis cetakan yang bias digunakan secara berulang-ulang, cetakan jenis ini merupakan cetakan yang cara kerjanya dipadukan dengan tekanan hidrostatik, sehingga jika

digunakan untuk pengecoran logam selain baja, seperti aluminium, timah, seng yang titik didihnya dibawah baja akan sangat baik hasilnya. Selain itu cetakan permanen ini sangat efektif jika digunakan untuk memproduksi produk yang jumlahnya banyak. Jenis cetakan ini dibagi menjadi tiga antara lain : Gravity permanent mold casting, Pressure die casting, Centrifugal die casting.

2. Bagian-Bagian Cetakan

Bagian-bagian cetakan dapat di bagi secara umum sebagai berikut :

- a. Core (inti), bagian ini merupakan bagian yang sangat penting dan harus mempunyai daya tahan yang tinggi untuk menahan temperature logam cair. Bagian ini berfungsi sebagai pembentuk profil dari cetakan.
- b. Cavity (rongga cetakan), merupakan bagian utama dari cetakan logam, karena fungsinya sebagai dasar dari bentuk benda yang dicor. Bagian ini juga sebagai penampung cairan logam yang dituangkan kedalam cetakan.
- c. Gating sistem (sistem saluran masuk), merupakan bagian yang digunakan untuk mengalirkan cairan logam kedalam rongga cetakan.
- d. Sprue (Saluran turun), merupakan bagian yang juga mengalirkan cairan logam namun berposisi vertical.

- e. Pouring basin, merupakan bagian yang berbentuk lekukan yang digunakan untuk memperlambat cairan logam masuk kedalam spruedengan tujuan agar tidak terjadi erosi pada sprue.
- f. Raiser (penambah), merupakan bagian cetakan yang berfungsi sebagai penampung cairan logam untuk menambah jika terjadi penyusutan pada cetakan. Soejono Tjitro, (2011) melakukan penelitian pengaruh bentuk riser terhadap cetakan pasir, menunjukkan cacat penyusutan (shrinkage defect) dipengaruhi oleh nilai casting modulus. Selain itu, diameter leher riser harus memiliki batas minimal untuk menghindari tidak berfungsinya riser.

2.2. Titanium

Titanium adalah logam yang mempunyai sifat kekuatan tinggi, kepadatan rendah dan ketahanan korosi yang sangat baik, ini adalah sifat utama yang membuat titanium menarik untuk berbagai aplikasi. Salah contoh adalah kontruksi pesawat (kombinasi antara kekuatan dan kepadatan rendah), mesin pesawat (kekuatan tinggi, kepadatan rendah, dan ketahanan mulur yang baik hingga sekitar 550° C), peralatan biomedis (ketahanan korosi dan kekuatan yang tinggi). (James C.Williams. 2007)

Titanium sebenarnya bukan zat langka karena menempati urutan ke-9 sebagai elemen paling banyak dan keempat logam struktural yang paling melimpah di kerak bumi hanya melebihi aluminium, besi, dan magnesium. Sayangnya, jarang ditemukan dalam konsentrasi tinggi dan tidak pernah

ditemukan dalam keadaan murni. Jadi, kesulitannya dalam memproses logam membuatnya mahal. Titanium yang mempunyai kepadatan $4,51 \text{ g cm}^3$ menjadi logam ringan terberat, meskipun hanya setengah berat dari besi atau nikel namun beratnya mencapai dua kali berat aluminium. (C. Leyens and M. Peters. 2003)

Table 2.2 Sifat fisik kemurnian tinggi polikristalin α titanium (C. Leyens and M. Peters. 2003)

No.	Sifat fisik titanium	(>99.9%) at 25C.
1.	Struktur prototipe	Mg
2.	Simbil pearson	hP2
3.	Ruang grup	P6 ₃ /mmc (194)
4.	Suhu β -transus	882°C
5.	Parameter kisi	a=0.295 nm
		c=0.468 nm
		c/a=1.587
6.	Koefisien ekspansi termal [10^{-6}K^{-1}]	8.36
7.	Konduktivitas termal [W/mK]	14.99
8.	Kapasitas panas spesifik [J/kgK]	532
9.	Ketahanan listrik [$10^{-9}\Omega\text{m}$]	564.9
10.	Modulus elastis [Gpa]	115
11.	Modulus geser [Gpa]	44
12.	Rasio poisson	0.33

Adapun Titanium yang di gunakan dalam penelitian ini adalah Ti-6Al-4V dengan spesifikasi Menurut Haize Galarraga dkk (2017) adalah sebagai berikut :

No.	Ti-6Al-4V	
	Kandungan	Persentase
1.	Al	5,5 – 6,5 %
2.	V	3,5 – 4,5 %
3.	C	< 0,08 %
4.	Fe	< 0,25 %
5.	O	< 0,13 %
6.	N	< 0,05 %
7.	H	< 0,012 %
8.	Ti	sisanya

2.2.1 Klasifikasi paduan titanium

Penggunaan paduan titanium sebagai bahan struktur telah menyebar luas di dalam dunia teknik mesin, karena rasio kekuatan dan keuletan yang tinggi, kemampuan machinability yang baik dan dan kemampuan las yang cocok untuk semua jenis pengelasan.

1. paduan kekuatan tinggi keuletan rendah

Titanium pada paduan jenis ini dapat mencapai kekerasan sampai 700 mpa. VT1-00 adalah salah satu contoh dari jenis paduan ini, komposisi kimia titanium VT1-00 tidak boleh melebihi tarif berikut (wt .%): C, 0,05; Fe, 0,20; Si, 0,08; O₂, 0,20; N₂, 0,04; H₂, 0,008; kotoran lainnya, 0,10. Adapun sifat fisik utama dari VT1-00 adalah mempunyai kepadatan pada 20 °C 4,52 g / cm², konduktivitas termal dan kapasitas panas pada berbagai suhu. Dan kekerasan brinel VT1-00 bervariasi antara 116-149 kg / mm². Salah satu sifat titanium jenis ini adalah ketahanannya dalam korosi yang sangat baik, ketahanan korosi paduan ini dapat mencapai 600° C di udara dan 300-350° C pada air laut. Karena kekuatannya yang rendah maka paduan ini jarang digunakan sebagai material structural, namun banyak digunakan pada kontruksi yang dioperasikan jangka panjang pada suhu 200-250° C. (*Titanium Alloys Russian Aircraft and Aerospace Applications*, 2006)

2. Paduan kekuatan sedang

Pada paduan jenis ini adalah titanium jenis paduan kekerasan sedang, yang kekerasannya mencapai 750-1000 Mpa. OT4, PT3-V, VT5-1, VT6S, VT20, TS5, VT6, VT14, VT16 adalah beberapa contoh dari jenis paduan ini, pada beberapa paduan seperti OT4 dan VT6S mengandung unsur β -stabilizing yang meningkat (kelarutan yang lebih besar dalam α -titanium) dapat dikeraskan oleh quenching dan penuaan. Namun, efek pengerasan tidak signifikan dan tidak memiliki kepentingan komersial. Penggunaan dari paduan jenis ini cocok untuk segala macam kontruksi dan juga pada dunia pengelasan, paduan jenis ini banyak di gunakan pada berbagai produk

tenik mesin. (*Titanium Alloys Russian Aircraft and Aerospace Applications*, 2006)

3. Paduan kekuatan tinggi

Kelompok ini mencakup paduan titanium yang dikeraskan secara termal yang kekuatannya tinggi dicapai dengan pendinginan dan penuaan, yang kekerasannya mampu mencapai 1100 Mpa. Adapun beberapa contoh dari jenis paduan ini adalah VT6, VT14, VT16, VT23, VT22, VT22I, VT35, VT32, dan TS6. Pada paduan jenis ini mampu mendapatkan nilai kekerasan brinell kisaran 255-341 kgf / mm² dan 293-361 kgf / mm², dengan emisivitas normal dari logam berpemanas yang dipanaskan dengan udara (suhu, 200 dan 500 ° C). aplikasi dari paduan ini biasanya berbentuk lembaran, profil, atau pipa. (*Titanium Alloys Russian Aircraft and Aerospace Applications*, 2006)

2.2.2 Paduan Titanium Berbasis Intermetallic

Di masa lalu, penggunaan senyawa kimia sebagai bahan structural pembentukan logam di anggap tidak cocok karena kombinasi sifat yang tidak menguntungkan, seperti perpaduan kekuatan tinggi dengan kerapuhan. Namun, dalam beberapa kasus, senyawa ini terbukti dapat diterima dan kadang-kadang mengatur sifat fisikomekanik. Dalam sebuah paduan titanium, satu paduan dapat dibagi menjadi tiga kelompok: paduan suhu tinggi berdasarkan titanium aluminide, bentuk paduan memori berdasarkan titanium nikel, dan paduan dengan eutektoid yang digunakan sebagai paduan tahan api di gedung mesin. Dengan tambahan senyawa kimia paduan, terbukti memungkinkan untuk mengembangkan paduan berdasarkan

titanium aluminides dan nikel, dan paduan dengan eutektoid, yang dekat dengan paduan titanium komersial oleh satu set properti. Sejumlah proses, beberapa di antaranya baru, telah digunakan untuk produksi komersial dari paduan berbasis intermetalik seperti mikrogulasi, pembentukan serpih dan serat yang didinginkan dengan cepat, pemadatan bubuk dan potongan-potongan dalam gasostat, pembentukan isotermik dengan tingkat kecil, dan beberapa lainnya. (*Titanium Alloys Russian Aircraft and Aerospace Applications*, 2006)

1. Titanium aluminides

Sistem paduan (Ti-Al) ini adalah paduan yang mencakup tiga senyawa kimia sesuai dengan formula stoikiometri $TiAl_3$ (fase α_2), TiAl (fase γ) dan $TiAl_3$. Dua yang pertama adalah formula sebagai dasar untuk mengembangkan paduan pada suhu tinggi. Pada table di bawah menyajikan beberapa sifat fisikomekanik paduan tersebut dibandingkan dengan paduan titanium komersial dan nikel biasa. Data menunjukkan bahwa paduan berbasis aluminida secara signifikan melebihi paduan titanium oleh beberapa sifat dan sebanding dengan paduan nikel.

Ini mengacu pada modulus elastisitas dan suhu operasional, yang 100-200 ° C lebih tinggi daripada paduan titanium komersial.

Table 2.1.2 Perbandingan sifat paduan titanium berbasis alumina dan nikel. (*Titanium Alloys Russian Aircraft and Aerospace Applications*, 2006)

Properties	Ti (base)	Ti ₃ Al	TiAl	High temperatur
Density, g/cm ³	4.5	4.15-4.7	3.76	8.3
Young's modulus	110-96	145-110	176	206
Operational temperature:				
by admissible creep, °C	550	800	1050	1100
by admissible oxidation, °C	600	650	1050	1100
°C	20	2-5	1-2	3-5
Ductility at 20°C, %	Over 20	5-8	7-12	10-20
Ductility at operational temperature, %				

Karena kandungan aluminium yang tinggi, paduan berdasarkan fase α_2 dan memiliki ketahanan panas yang baik di atmosfer udara dan ketahanan terhadap oksidasi intensif yang diamati pada paduan titanium komersial pada suhu di atas 600 ° C dan pemanasan operasional jangka panjang. Keuntungan utama alumina titanium sebagai bahan struktural untuk industri pesawat terbang adalah kekuatan suhu tinggi, peningkatan modulus elastisitas, dan kepadatan rendah. Keunggulan ini memungkinkan mereka untuk bersaing tidak hanya dengan paduan titanium bersuhu tinggi tetapi juga dengan paduan berbasis nikel. Di atas didukung oleh plot yang menyajikan ketergantungan

kekuatan spesifik untuk berbagai paduan pada berbagai suhu. (*Titanium Alloys Russian Aircraft and Aerospace Applications*, 2006)

2. Titanium nickelide

Titanium nickelide, berbeda dengan titanium aluminides yang berada pada kondisi pengujian dan produksi pesawat terbang, telah banyak digunakan secara komersial, dan aplikasinya menjadi lebih luas. Fitur utama dari titanium nikel yang menentukan nilainya sebagai bahan struktural adalah bentuk efek memori, yaitu kemampuan logam yang bentuknya sangat berubah untuk mengembalikan konfigurasi awal dengan memanaskan hingga suhu tertentu. Paduan tambahan titanium nickelide dengan besi, tembaga, dan elemen lain memungkinkan untuk menyesuaikan suhu pemulihan bentuk dalam batas yang luas tergantung pada kebutuhan. Senyawa kimia TiNi termasuk dalam kelas berthollides dan kisaran homogenitasnya bervariasi dari 2 hingga 5%. Suhu leleh adalah 1240 ° C. (*Titanium Alloys Russian Aircraft and Aerospace Applications*, 2006)

3. Eutectoid-based alloys

Paduan berbasis Eutektoid digunakan sebagai paduan tahan api untuk fabrikasi bagian mesin pesawat, pisau, dll. Struktur paduan ini adalah sekitar 50% eutektoid, yang meleleh atau kehilangan kekuatan pada suhu yang relatif rendah dan, dengan demikian, mencegah kebakaran. komponen dan konstruksi di bawah kondisi ekstrim. Paduan ini mengandung sekitar 17% tembaga, 15% kromium, dan juga elemen lainnya - aluminium, molibdenum, vanadium, niobium, timah, dan zirkonium. (*Titanium Alloys Russian Aircraft and Aerospace Applications*, 2006)

2.3. Alumunium

Alumunium adalah logam yang paling melimpah keberadaanya di bumi, jumlahnya mencapai 8% dari bumi. Produksinya sejak 1965 telah melampaui tembaga dan harganya sekarang mampu bersaing dengan tembaga. Penggunaanya mulai dari bidang kontruksi sampai industry kelistrikan. Meskipun konduktivitas listrik dari aluminium sedikit lebih rendah daripada tembaga, masih ekonomis untuk digunakan dalam preferensi untuk tembaga di kabel listrik karena bobotnya yang lebih ringan. (*Handbook of Aluminum*, 2003)

Alumunium murni adalah logam yang mempunyai sifat-sifat dan karakteristik yang unik dibanding logam yang lain, meskipun tingkat kekerasan alumunium tidak terlalu tinggi namun perbandingan antara kekerasan terhadap beratnya masih lebih tinggi dibandingkan dengan baja. Alumunium murni mempunyai berat jenis sebesar $2,643 \text{ kg/m}^3$, titik cair sebesar $660,2^\circ\text{C}$, panas jenis sebesar $0,2226 \text{ kg/kj}^\circ\text{C}$, hantaran listrik sebesar 64,94, tahanan listrik koefisien temperature sebesar 0,00429, koefisien pemuaian sebesar $23,87 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$, dan alumunium murni mempunyai jenis kristal fcc, $a = 4,04 \text{ \AA}$. (Sundari, 2011)

2.3.1 Pengelompokan komposisi alumunium

Dalam pengelompokan komposisi paduan alumunium dibedakan berdasarkan kode penomoran, sistem penunjukan paduan casting ini disebut 'aluminum association' (AA). Dibawah ini adalah beberapa pengelompokan paduan alumunium dengan standart AA :

1xx.x, pure aluminum (99.00% or greater), 2xx.x, aluminum-copper alloys, 3xx.x, aluminum-silicon copper and/or magnesium, 4xx.x, aluminum-silicon, 5xx.x,

aluminum-magnesium, 7xx.x, aluminum-zinc, 8xx.x, aluminum-tin, 9xx.x, aluminum other elements, 6xx.x, unused series

Dalam sebutan jenis 1xx.x, digit kedua dan ketiga menunjukkan konten aluminium minimum (99,00% atau lebih besar); digit ini sama dengan dua di sebelah kanan titik desimal dalam persentase aluminium minimum yang dinyatakan hingga 0,01% terdekat. Misalnya, alloy 170.0 mengandung minimum 99,70% Al. Dalam 2xx.x hingga 8xx.x sebutan untuk paduan aluminium, digit kedua dan ketiga tidak memiliki signifikansi numerik, tetapi hanya secara sembarangan mengidentifikasi paduan individu dalam kelompok. (*Aluminum Alloy Castings*, 2003)

2.4. Metal Matrix Composite

MMC adalah pengetahuan dibidang material material yang termasuk baru, kurangnya pengetahuan yang terkait dengan mereka masih harus diisi. Beberapa masalah teknologi harus diatasi untuk menghasilkan nanokomposit massal yang dicirikan oleh dispersi nanopartikel homogen dan kinerja mekanik yang tinggi. Pemahaman fenomena fisik yang terkait dengan perilaku mekanis dan sifat-sifat fungsionalnya yang ditingkatkan masih belum lengkap dan perlu pemahaman yang lebih dalam. Komposit umumnya memiliki beberapa karakteristik unggul dari komponen individu. Sejumlah rute pemrosesan tersedia untuk sintesis komposit matriks logam yang diperkuat nano. Mereka didasarkan baik pada sintering padat atau pada pengolahan cair. Konsolidasi bubuk, umumnya didahului oleh penggilingan bola berenergi tinggi, dapat dilakukan baik dengan teknik konvensional (dengan metode panas), atau dengan metode alternatif, seperti ECAP atau ekstrusi panas. Meskipun sifat potensial mereka, masih ada

beberapa aspek yang harus diperbaiki dalam produksi komposit matriks logam (MMC) yang diperkuat dengan nanopartikel. (*Aluminum Matrix Composites Reinforced with Alumina Nanoparticles*, 2016)

2.4.1. Mekanisme Penguatan

Menurut buku (*Aluminum Matrix Composites Reinforced with Alumina Nanoparticles*, 2016) kekuatan tinggi yang dihasilkan oleh metal matrix composite adalah akibat dari proses kontribusi mekanisme penguatan seperti di bawah ini :

1. Efek transfer beban

Pengalihan beban dari matrix lunak ke partikel kaku dan keras dibawah beban eksternal yang diterapkan, memberikan kontribusi pada penguatan dasar.

2. Hall-Petch Strengthening

Ukuran butir memiliki pengaruh yang kuat pada kekuatan logam karena batas butir dapat menghambat gerakan dislokasi. Hal ini disebabkan oleh orientasi kristal yang berbeda dari butiran yang berdekatan dan karakteristik gangguan kisi yang tinggi dari daerah-daerah ini, yang mencegah dislokasi bergerak dalam bidang slip yang terus menerus. Menghambat gerakan dislokasi, batas butir menghambat permulaan plastisitas yang luas dan karenanya meningkatkan kekuatan luluh dari material. Ketika beban eksternal menghasilkan tegangan geser dalam material, dislokasi yang ada dan

dislokasi baru bergerak melintasi kisi kristal sampai menghadapi batas butir, yang menciptakan medan stres yang menghalangi gerakan dislokasi. Kemudian, dislokasi menumpuk terjadi menghasilkan medan stres yang luas bertindak sebagai kekuatan pendorong untuk mengurangi penghalang energik untuk difusi mereka melalui batas. Penurunan ukuran butir menyebabkan penurunan jumlah tumpukan up yang luas. Maka beban yang perlu diterapkan untuk gerakan dislokasi melalui material harus lebih tinggi. Semakin tinggi tegangan yang dibutuhkan untuk memindahkan dislokasi, semakin tinggi kekuatan luluh.

3. Orowan Strengthening

Mekanisme Orowan yang disebut terdiri dalam interaksi langsung dari nano-partikel dengan dislokasi. Partikel keramik yang tidak dapat dijangkau menyematkan persimpangan dislokasi dan mendorong dislokasi membentur di sekitar partikel di bawah beban eksternal. Penguatan Orowan lebih relevan untuk MMnCs dengan ukuran partikel lebih kecil dari 100 nm [52-54, 67, 68]. Hal ini karena partikel berukuran lebih besar mengarah ke jarak interparticle besar untuk fraksi volume partikel yang sama dan cenderung memisah ke batas butir. Dalam keadaan ini, kontribusi mekanisme bowling Orowan menjadi tidak berarti.

4. Ketidalcocokan koefisien ekspansi termal dan modulus elastis

Bahkan setelah kondisi-kondisi pemrosesan yang sangat cocok (jumlah deformasi yang diberikan, waktu dan temperatur pemrosesan dan perlakuan panas), kerapatan dislokasi yang jauh lebih tinggi ada dalam matriks komposit daripada dalam matriks unreinforced karena tegangan sisa termal. Peningkatan densitas dislokasi dari kontribusi regangan plastik residual berkembang selama pendinginan pasca pemrosesan sebagai akibat dari koefisien ekspansi termal yang berbeda antara matriks dan fase penguatan. Medan tegangan tinggi di sekitar penguat dilonggarkan oleh gerakan dislokasi pada antarmuka penguatan-matriks. Dislokasi tersebut juga disebut geometrically necessary dislocations (GNDs).

Juga celah dalam modulus elastis antara partikel kaku dan matriks yang sesuai dapat menyebabkan pembentukan dislokasi tambahan selama ketegangan elastis nanokomposit.

5. Jumlah kontribusi

Kekuatan akhir dari MMnC cukup sulit untuk diperkirakan; untuk tujuan ini, model yang berbeda telah diajukan. Yang termudah tidak memperhitungkan tumpang tindih efek penguatan bersamaan. Ini mengevaluasi kekuatan akhir dari komposit, penguat hanya dengan menjumlahkan kontribusi yang terkait dengan efek penguatan tunggal, dengan kekuatan luluh asli dari matriks unreinforced, , oleh karena itu Penelitian lain mengusulkan metode alternatif untuk menghitung penguat, mempertimbangkan

superposisi dari efek. Sebuah model sederhana, yang mendekati cukup baik data eksperimen, menyarankan untuk menghitung kekuatan akhir dari komposit dengan menjumlahkan akar kuadrat dari semua kontribusi penguatan tunggal Metode umum lainnya yang memperhitungkan efek penguatan Orowan, kerapatan dislokasi karena regangan plastik residual yang disebabkan oleh ketidaksesuaian koefisien ekspansi dan modulus elastis.

